

# Фотолюминесценция ZnO, инфильтрованного в трехмерный фотонный кристалл

© А.Н. Грузинцев<sup>¶</sup>, Г.А. Емельченко\*, В.М. Масалов\*

Институт проблем технологии микроэлектроники Российской академии наук,  
142432 Черноголовка, Россия

\* Институт физики твердого тела Российской академии наук,  
142432 Черноголовка, Россия

(Получена 26 января 2009 г. Принята к печати 2 февраля 2009 г.)

Исследовано влияние стоп-зоны фотонного кристалла — искусственного SiO<sub>2</sub>-опала с внедренным оксидом цинка — на его люминесценцию в фиолетовой области спектра. Показано, что положение фотонной стоп-зоны в спектрах люминесценции и отражения инфильтрованного опала зависит от диаметра его наночастиц, объемной доли оксида цинка и угла регистрации сигнала. Обнаружены уменьшение интенсивности свечения и увеличение времени затухания люминесценции наноконструкций ZnO-опал в направлениях пространства, для которых спектральное положение стоп-зоны и максимума люминесценции оксида цинка совпадало. Изменение времени затухания можно объяснить изменением локальной плотности фотонных состояний в фотонной запрещенной зоне.

PACS: 78.55.Et, 78.66.Sq, 78.67.Hc, 81.07.Bc

## 1. Введение

Фотонные кристаллы (ФК) представляют собой периодические структуры с модуляцией диэлектрической проницаемости, период которой сравним с длиной волны света. Аналогично тому, как периодический потенциал атомов твердого тела приводит к появлению запрещенных зон для энергии электронов, в ФК могут появляться стоп-зоны для распространения фотонов определенных энергий [1–3]. Поэтому излучение источников света, внедренных внутрь фотонного кристалла, может быть сильно модифицировано фотонной стоп-зоной. Согласно золотому правилу Ферми, вероятность спонтанной люминесценции пропорциональна локальной плотности фотонных состояний и взаимодействию излучателя с локальным световым полем в образце. Поскольку локальная плотность фотонных состояний сильно зависит от формы и размера наноструктур, ФК возможно использовать для управления люминесценцией внедренных в них источников света. Данного рода эффекты широко исследуются с целью создания устройств квантовых вычислений [4], эффективных источников света [5] и солнечных элементов [6].

Большинство реализованных устройств используют двумерные фотонные кристаллы, состоящие из упорядоченного массива протравленных отверстий в прозрачном материале с высоким показателем преломления. Это требует использования довольно сложной технологии электронно-лучевой литографии. Существует другой, более простой метод получения периодических наноструктур с использованием внедрения полупроводникового материала в пористые ФК, например, опалы. Искусственные опалы занимают особое место среди трехмерных ФК и получают при самоорганизации в

растворе шаров оксида кремния нанометрового размера. Кубическая гранцентрированная кристаллическая решетка опала сформирована из плотно упакованных наночастиц аморфной двуокиси кремния. При этом поры между шарами легко можно заполнить различными полупроводниковыми материалами [7,8], изменяя тем самым положение стоп-зоны и излучательные свойства ФК. В работах [9,10] была разработана технология инфильтрации оксида цинка в трехмерную опаловую решетку методом химического осаждения из раствора, получены образцы композитов ZnO-опал, проявляющие преимущественно люминесценцию в ультрафиолетовой (УФ) области спектра при комнатной температуре.

Получение качественных наноструктур на основе оксида цинка с преобладающим свечением в ультрафиолетовой области спектра необходимо для создания мощных полупроводниковых источников света в этом диапазоне. Являясь полным аналогом нитрида галлия по своим оптическим, электрическим и структурным параметрам, оксид цинка существенно более прост в технологии получения и более стоек в эксплуатации. Более того, энергия связи свободного экситона в ZnO составляет 60 мэВ, что в 2 раза больше, чем в нитриде галлия. В результате экситонное излучение является доминирующим каналом рекомбинации в ZnO даже при комнатной температуре. Этот полупроводниковый материал характеризуется широкой запрещенной зоной (3.37 эВ), прямыми межзонными переходами и низким удельным сопротивлением, что позволяет использовать его для изготовления фотоспротивлений, полупроводниковых светодиодов, прозрачных контактов и окон солнечных элементов.

Цель данной работы — изучение оптических свойств композитов ZnO-опал, полученных методом инфильтрации из раствора. В первой части особое внимание будет уделено приготовлению и оптическим методам ис-

<sup>¶</sup> E-mail: gran@iptm.ru  
Fax: (495)9628047

следования фотонных кристаллов данного типа. Во второй части будет проведен анализ экспериментов по влиянию стоп-зоны ФК на спектры фотолюминесценции (ФЛ) и времена затухания люминесценции оксида цинка, внедренного в искусственный опал.

## 2. Эксперимент

В данной статье использованы искусственные опалы из шаров диоксида кремния, полученные методом седиментации из раствора. Монодисперсный раствор шаров диоксида кремния был получен при гидролизе тетраэтила ортосиликата (tetraethyl orthosilicate, TEOS) в этаноле в присутствии гидроксида аммония [10]. Размер и однородность синтезированных шаров определялись концентрацией аммония, воды и TEOS. Используя этот метод, можно синтезировать шары с диаметрами в диапазоне от 100 до 1300 нм. Стандартное отклонение диаметров сфер в растворе от среднего значения было около 5%. В нашем случае монокристаллы опала образовывались за несколько дней кристаллизации в растворе из шаров диоксида кремния диаметром  $\sim 285$  нм. Затем образцы опала сушились при температуре  $150^\circ\text{C}$  и отжигались на воздухе при  $600^\circ\text{C}$  в течение 5 ч. Такой отжиг необходим для полного удаления из опала органических компонентов раствора и приводил к уменьшению диаметра шаров опала до 225 нм. При использовании данного метода нам удавалось получать объемные монокристаллы искусственных опалов с характерными размерами  $5 \times 4 \times 2$  мм, с наибольшей естественной гранью ориентации (111). Заполнение пустот опаловой матрицы оксидом цинка осуществляли пропиткой раствором нитрата цинка  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  с дальнейшим разложением нитрата до оксида при термообработке на воздухе в течение 15 мин при  $600^\circ\text{C}$  (4 цикла пропитки). Методика пропитки изложена в работе [10]. Были приготовлены образцы композитов со степенью заполнения оксидом цинка 50%, рассчитанной по кривой набора веса.

Для электронно-микроскопического исследования тонкие образцы из нанокомпозитов были приготовлены механической шлифовкой массивных образцов с последующим утончением методом ионного травления. Исследования структуры были выполнены на просвечивающем электронном микроскопе JEOL JEM-2000FX. Для определения элементного состава использовали рентгеновскую энергодисперсионную спектроскопию. Спектрометр позволял регистрировать элементы, начиная с Na. Рентгенофазовый анализ образцов проводили на дифрактометре Siemens-D500 с  $\text{CuK}_\alpha$ -излучением. Из электронно-микроскопических изображений и электронограмм следует, что исследованные образцы композитов представляют собой регулярную структуру из шаров аморфного  $\text{SiO}_2$  размером 225 нм [9]. Пространство между шарами заполнено (полностью или частично) поликристаллическим материалом, в составе которого, как показывает анализ спектров характеристического рентгеновского излучения, полученных из объема

между соседними шарами, преобладает Zn в сравнении с Si. Наличие кремния в материале между шарами объясняется тем, что область возбуждения характеристического рентгеновского излучения превышает размеры пор. Полученные изображения и рентгеновские спектры показывают, что после 4 циклов заполнения не происходит полного насыщения оксидом цинка свободного пространства между шарами. Так, наряду с участками между шарами, имеющими темный неоднородный контраст, есть незаполненные участки, имеющие светлый однородный контраст. На темных участках четко видна мелкозернистая структура заполняющего материала. Электронограммы показывают, что этот материал — поликристаллический оксид цинка.

Спектры люминесценции регистрировались при возбуждении азотным лазером (ЛГИ-505) с длиной волны излучения 337.1 нм. Фотолюминесценция образца собиралась по нормали или под углом к поверхности опала оптическим волноводом и анализировалась с помощью двойного монохроматора МДР-6 и фотоумножителя ФЭУ-106. Исследованные композиты ZnO–опал имели интенсивную люминесценцию в ультрафиолетовой области спектра. Для изучения влияния упорядоченности наночастиц (наличия фотонной стоп-зоны) на спектр свечения исследовалась естественная монокристаллическая сторона (111) опалов, полученная после роста. Также было проведено изучение спектров отражения композитов в зависимости от угла падения света  $\varphi$  по отношению к поверхности опала. В этом случае в качестве источника непрерывного видимого спектра использовалась лампа накаливания „Narva-100“. Спектры ФЛ с временным разрешением были измерены с использованием второй гармоники титан-сапфирового лазера (энергия фотона 3.49 эВ, мощность 3 мВт, длительность импульса 100 фс) для возбуждения и стрик-камеры для регистрации. Временное разрешение этой системы было лучше, чем 10 пс. Измерения спектров проводились при комнатной температуре (300 К). Спектральное разрешение во всех измерениях было не хуже 0.1 нм.

## 3. Результаты и обсуждение

Поскольку стоп-зона ФК (опала) — неполная, распространение света данной частоты возможно в одних направлениях и запрещено в других. При этом максимальное отражение происходит на тех длинах волн, для которых разность фаз при отражении от соседних плоскостей (111) наночастиц в гранецентрированной кубической решетке опала кратна  $2\pi$ . Свет, проникая внутрь фотонного кристалла, испытывает брэгговское отражение от плоскостей плотной упаковки наночастиц и максимум отражения (стоп-зоны) расположен на длине волны [11]

$$\lambda_{\max} = 2\sqrt{2/3} d \sqrt{n^2 - \cos^2 \varphi}, \quad (1)$$

где  $d$  — диаметр шаров,  $n$  — усредненный показатель преломления и  $\varphi$  — угол падения света по отноше-

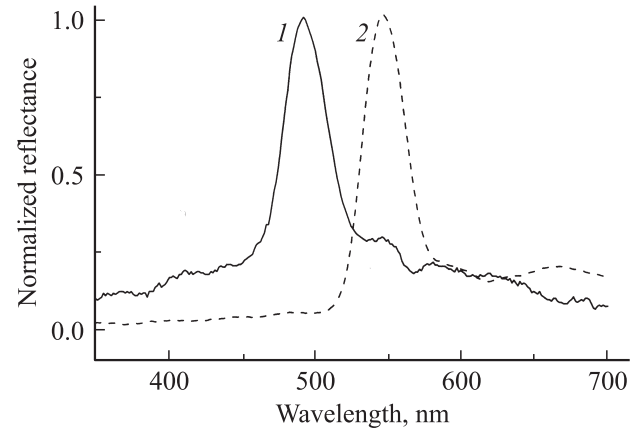
нию к плоскости опала. В работе [12] было показано, что на данной длине волны находится также минимум собственной люминесценции опала. При внедрении ZnO в поры между шарами опала максимум спектра отражения сдвигается в длинноволновую область спектра из-за возрастания усредненного показателя преломления (рис. 1). Для общего случая трехкомпонентной системы композита ZnO–опал показатель преломления можно описать выражением

$$n^2 = n_1^2 f_1 + n_2^2 f_2 + n_3^2 f_3, \quad (2)$$

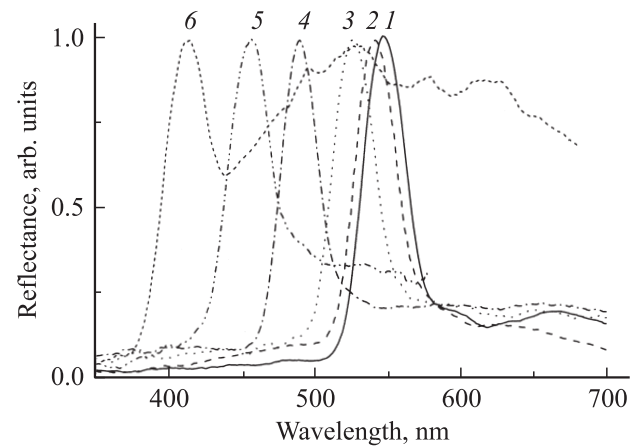
где  $n_1 = 1.45$ ,  $n_2 = 1$ ,  $n_3 = 2.2$  — показатели преломления и  $f_1, f_2, f_3$  — объемные доли оксида кремния, воздуха и оксида цинка соответственно ( $f_1 + f_2 + f_3 = 1$ ).

Вначале мы исследовали спектры отражения опалов с диаметрами широв 225 нм при нормальном ( $\varphi = 90^\circ$ ) падении света (рис. 1, кривая 1) до внедрения оксида цинка. Они имеют характерный максимум в синей области при 492 нм. Этот максимум отражения обусловлен стоп-зоной ФК и хорошо совпадает с вычислениями по формуле (1) для нормального падения света ( $\varphi = 90^\circ$ ) и значения усредненного показателя преломления  $n = 1.34$ . Средний показатель преломления для плотно упакованной структуры незаполненного ( $f_3 = 0$ ) опала может быть оценен по формуле (2) с учетом объемных долей заполнения  $f_1 = 0.74$  для шаров и  $f_2 = 0.26$  для пор. Остановимся более подробно на оптическом методе определения доли внедрения ZnO в опал по спектру отражения. Видно, что четыре цикла инфильтрации дают максимум отражения композита при 550 нм (кривая 2), что соответствует по формуле (1) значению усредненного показателя преломления  $n = 1.5$ . Это, согласно формуле (2), возможно только при следующих объемных долях заполнения:  $f_1 = 0.74$  для шаров и  $f_2 = 0.145$ ,  $f_3 = 0.115$  для пор. Следовательно, фактор заполнения объема пор оксидом цинка составляет в нашем композите  $f_3/(f_2 + f_3) = 0.115/0.26 = 0.44$  (или 44%), что слегка отличается от ожидаемых 50% по кривой набора веса в процессе инфильтрации из раствора.

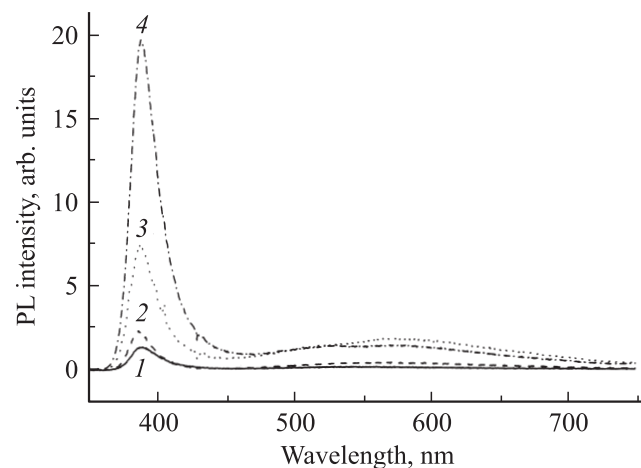
Согласно выражению (1), положение стоп-зоны ФК в спектре зеркального отражения должно зависеть от угла падения света. Для определения положения стоп-зоны для разных углов падения были проведены измерения спектров отражения нанокompозита ZnO–опал (рис. 2). Отметим сдвиг характерного максимума из видимой в коротковолновую область спектра с уменьшением угла падения. Хорошо видно, что для углов падения света меньше  $\varphi = 22.5^\circ$  (кривая 6) максимум отражения (или фотонной стоп-зоны) опала с внедренным оксидом цинка находится на длине волны  $\sim 400$  нм, т.е. уже в фиолетовой области спектра. Если учесть наличие интенсивной экситонной люминесценции в оксиде цинка в этом спектральном диапазоне, то интересно исследовать влияние фотонной стоп-зоны на ее характеристики. Для этого мы брали нанокompозиты ZnO–опал с размером наночастиц 225 нм и смотрели зависимость сигнала ФЛ



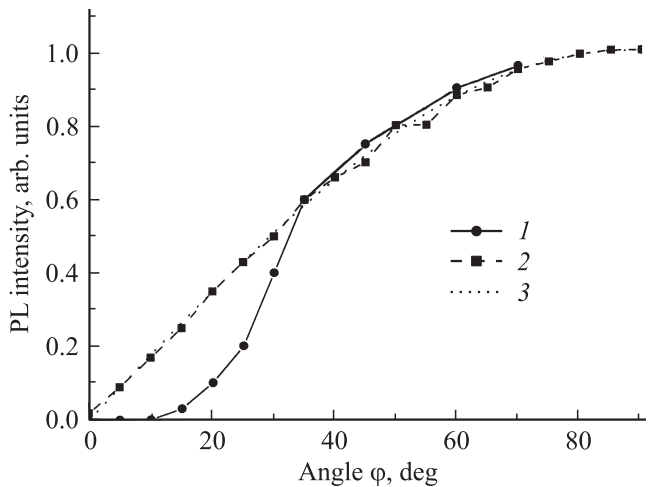
**Рис. 1.** Спектры отражения при нормальном падении света для искусственного опала с диаметром шаров 225 нм: 1 — исходный образец, не заполненный ZnO; 2 — образец с содержанием ZnO в пустотах опаловой решетки 44%. Температура измерения 300 К.



**Рис. 2.** Спектры отражения композитов ZnO–опал (4 цикла заполнения) для различных углов падения света  $\varphi$  относительно поверхности: 1 —  $90^\circ$ , 2 —  $75^\circ$ , 3 —  $60^\circ$ , 4 —  $45^\circ$ , 5 —  $30^\circ$ , 6 —  $22.5^\circ$ . Температура измерения 300 К.



**Рис. 3.** Спектры фотолуминесценции (PL) композита ZnO–опал после 4 циклов заполнения, деленные на  $\sin \varphi$ , при регистрации под различным углом  $\varphi$  к поверхности: 1 —  $12^\circ$ , 2 —  $20^\circ$ , 3 —  $35^\circ$ , 4 —  $50^\circ$ . Температура измерения 300 К.



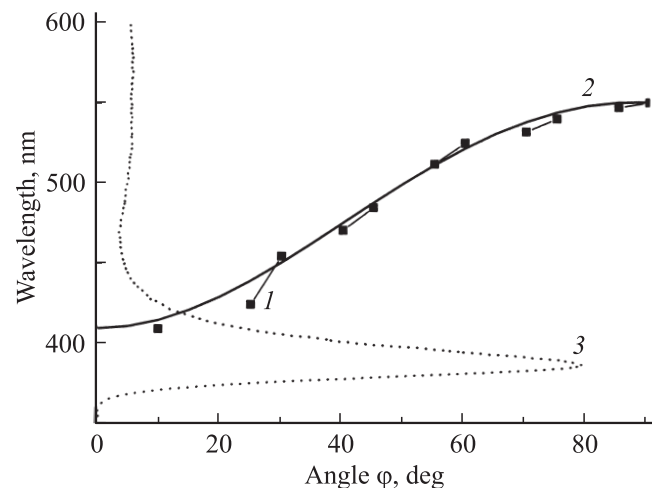
**Рис. 4.** Зависимости интенсивности максимума свечения (PL) при 387 нм композитов ZnO—опал с диаметром шаров 225 нм от угла регистрации  $\phi$  по отношению к поверхности: 1 — сухой композит, 2 — пропитанный деканом. 3 — теоретическая зависимость  $\sin \phi$  по закону Ламберта. Температура измерения 300 К.

от угла регистрации (рис. 3). Спектры люминесценции состоят из двух полос — краевого, при 387 нм, и дефектного, при 580 нм, свечения. При этом интенсивность экситонной фиолетовой полосы существенно выше даже при комнатной температуре измерений. Видно, что с уменьшением угла регистрации сигнала интенсивность свечения резко падает даже с учетом закона Ламберта. Дело в том, что положение стоп-зоны сдвигается по формуле (1) в коротковолновую область с уменьшением  $\phi$  — угла падения света по отношению к поверхности опала. Для некоторого угла линия люминесценции ZnO с максимумом при 387 нм попадает в стоп-зону и ее интенсивность должна резко падать. На рис. 4 видно, что интенсивность экситонной люминесценции оксида цинка начинает резко падать по отношению к закону Ламберта ( $\sin \phi$ ) для углов регистрации, меньших  $30^\circ$  (кривая 1). Чтобы убедиться во влиянии на данный эффект именно стоп-зоны фотонного кристалла, было проведено измерение угловой зависимости люминесценции композита ZnO—опал, пропитанного деканом. Дело в том, что показатель преломления декана составляет  $n_2 = 1.41$  и близок к показателю преломления сфер опала  $n_1 = 1.45$ . Поэтому при заполнении пор опала данной жидкостью получается однородная прозрачная среда без запрещенной фотонной зоны. В результате угловая зависимость люминесценции оксида цинка (кривая 2) получается близкой к закону Ламберта для изотропно рассеивающей однородной среды.

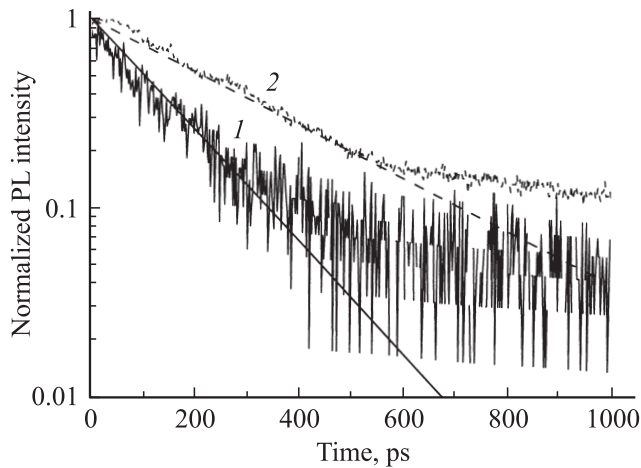
Чтобы понять различное поведение этих зависимостей для композитов с фотонной запрещенной зоной и без нее обратимся к кривым 1 и 2 на рис. 5. Здесь приведены экспериментальные и теоретические значения положения максимума стоп-зоны от угла регистрации для образца

ZnO—опал без декана, взятые из спектров отражения и рассчитанные по формуле (1) соответственно. Видно, что излучение оксида цинка с максимумом при 387 нм (кривая 3 на рис. 5) попадает в стоп-зону фотонного кристалла с диаметром шаров 225 нм только при малых углах регистрации. Начинается пересечение стоп-зоны, ширина на полувысоте которой более 50 нм, и экситонной полосы ФЛ для углов менее  $30^\circ$ . При этом из-за отсутствия в стоп-зоне необходимых фотонных состояний с длиной волны 387 нм происходит уменьшение вероятности испускания фиолетового света полупроводником ZnO в данном направлении пространства. Происходит эффект подавления спонтанного излучения оксида цинка в фотонной щели исследованного ФК.

Поскольку исследованный оксид цинка имел внешний квантовый выход люминесценции на длине волны 387 нм более 90%, изменение вероятности спонтанной люминесценции в стоп-зоне нанокompозита ZnO—опал должно проявляться в изменении времени затухания ФЛ при импульсном возбуждении. На рис. 6 приведены кривые затухания люминесценции на длине волны 387 нм, измеренные для нанокompозита с размером наночастиц 225 нм (доля заполнения ZnO — 44%) вне и в стоп-зоне фотонного кристалла (кривые 1 и 2 соответственно). Можно выделить на кривых затухания участки быстрого и медленного спада интенсивности ФЛ. При этом если постоянная времени медленного затухания одна и та же для разных углов регистрации, то постоянная времени быстрого затухания равна 180 пс для угла регистрации  $\phi = 90^\circ$  (кривая 1) и 320 пс для угла регистрации  $\phi = 20^\circ$  (кривая 2). Следовательно, при попадании полосы свечения оксида цинка в стоп-зону фотонного кристалла нанокompозита ZnO—опал происходит увеличение излучательного времени жизни



**Рис. 5.** Экспериментальная зависимость положения максимума отражения композита ZnO—опал с диаметром шаров 225 нм (1) и теоретическая зависимость положения максимума отражения (2) от угла регистрации по отношению к поверхности. 3 — спектр свечения композита. Температура измерения 300 К.



**Рис. 6.** Кривые затухания фотолюминесценции (PL) нанокompозитов ZnO–опал (44%) с диаметром шаров 225 нм при регистрации на длине волны 387 нм под различным углом  $\varphi$  к поверхности: 1 —  $90^\circ$ , 2 —  $20^\circ$ . Температура измерения 300 К.

возбужденного состояния свободных экситонов. Отметим, что постоянная времени медленного затухания люминесценции может быть обусловлена освобождением электронов, из ловушек в полупроводнике и не зависит от угла регистрации.

Для объяснения обнаруженного изменения излучательного времени жизни  $t_r$  экситонов оксида цинка в фотонном кристалле необходимо учесть изменение локальной плотности состояний фотонов в зависимости от положения и направления излучения диполя в ФК. Дело в том, что вероятность спонтанной люминесценции  $P_{if}$  диполя  $\mathbf{D}$  при переходе из начального  $\psi_i$  в конечное  $\psi_f$  состояние определяется суммой квадратов матричных элементов по всем возможным волновым векторам  $\mathbf{k}$  и поляризациям  $\mathbf{e}$  электромагнитных флуктуаций вакуума  $\mathbf{E}$  [13]:

$$P_{if} \propto 1/t_r \propto \sum_{\mathbf{k}} \sum_{\mathbf{e}} \langle \psi_i | \mathbf{E} \cdot \mathbf{D} | \psi_f \rangle^2. \quad (3)$$

Однако последние из-за интерференции на сферах опала квантуются и имеют узлы и пучности, аналогичные интерференции реального светового поля на данной длине волны. Таким образом, когда диполь пытается излучить в локализованную моду (или направление), запрещенную фотонным кристаллом ( $\mathbf{E} = 0$ ), вероятность спонтанной люминесценции (3) уменьшается, а время затухания свечения возрастает. Напротив, для излучения в разрешенные моды (направления) возбужденные электроны с большой вероятностью рекомбинируют излучательно и времена затухания ФЛ уменьшаются. Аналогичный эффект влияния изменения локальной плотности состояний фотонов на времена затухания люминесценции был продемонстрирован в наностержнях ZnO [14]. Для стержней разной длины (или числа продольных фотонных мод) и одинакового диаметра наблюдалось изменение времени затухания спонтанной ФЛ почти на порядок величины.

## 4. Заключение

Таким образом, разработаны методы эффективного внедрения полупроводника ZnO в опаловую матрицу при инфильтрации из раствора. Полученные нанокompозиты — фотонные кристаллы — обладали интенсивной фиолетовой люминесценцией с длиной волны 387 нм, характерной для рекомбинации свободных экситонов. Представленные результаты исследования спектров люминесценции трехмерных фотонных кристаллов из композитов ZnO–опал позволили определить влияние на их люминесцентные свойства фотонной стоп-зоны. Если в спектрах отражения запрещение на распространение некоторых длин волн света в фотонном кристалле (стоп-зона) проявляется в виде максимумов отражения, то в люминесценции, напротив, возникают провалы. Полупроводниковый материал не может излучать свет данных длин волн в определенных направлениях. Уменьшение интенсивности свечения нанокompозитов происходило в направлениях, для которых спектральное положение стоп-зоны и максимума люминесценции ZnO совпадало.

Исследование времени затухания ФЛ нанокompозитов ZnO–опал позволило детектировать увеличение времени излучательной рекомбинации свободных экситонов оксида цинка при попадании их характерного свечения в стоп-зону фотонного кристалла. Полученные выше данные о спектрах люминесценции и энергетическом положении стоп-зоны нанокompозитов в зависимости от угла выхода излучения также можно использовать для создания лазеров с распределенной обратной трехмерной связью на основе оксида цинка. При внедрении в опал полупроводниковых материалов последние располагаются в порах опала на поверхности наносфер и могут усиливать свет с энергией фотона, соответствующей энергии края стоп-зоны для данного направления. Показано, что сравнение спектров отражения инфильтрованного и чистого опала позволяет определить объемную долю внедренного полупроводника.

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке программы РАН „Квантовые вычисления“ и грантов РФФИ (проекты № 09-02-90300, 09-02-00095 и 07-02-92176).

## Список литературы

- [1] X. Wu, A. Yamilov, X. Liu, S. Li, V.P. David, R. Chang, H. Cao. Appl. Phys. Lett., **85**, 3657 (2004).
- [2] M. Scharrer, A. Yamilov, X. Wu, H. Cao, R. Chang. Appl. Phys. Lett., **88**, 2011 03 (2006).
- [3] P.D. Garcia, C. Lopez. J. Appl. Phys., **99**, 0461 03 (2006).
- [4] S. Laurent, S. Varoutsis, L. Le Gratiet, A. Lemaire, I. Sagnes, F. Raineri, A. Levenson, I. Robert-Philip, I. Abram. Appl. Phys. Lett., **87**, 1020 (2005).
- [5] O. Gauthier-Lafaye, D. Mulin, S. Bonnefont, X. Checoury, J. Lourtioz, A. Talneau, F. Lozes-Dupuy. IEEE Phot. Technol. Lett., **17**, 1587 (2005).

- [6] G. Ruani, C. Ancora, F. Corticelli, C. Dionigi, C. Rossi. *Sol. Energy Mater. and Solar Cells*, **92**, 537 (2008).
- [7] C. Daiz-Guerra, J. Piguera, D.A. Kurdyukov, V.I. Sokolov, M.V. Zamoryanskaya. *J. Appl. Phys.*, **89**, 2720 (2001).
- [8] V.Y. Davydov, V.G. Golubev, N.F. Kartenko, D.A. Kurdyukov, A.B. Pevtsov, S.M. Samoïlovich, N.V. Sharevkova, P. Brogueira, R. Schwarz. *Nanotechnology*, **11**, 291 (2000).
- [9] Г.А. Емельченко, А.Н. Грузинцев, М.Н. Ковальчук, В.М. Масалов, Э.Н. Самаров, Е.Е. Якимов, К. Барту. *ФТП*, **39**, 1375 (2005).
- [10] Г.А. Емельченко, А.Н. Грузинцев, Г.И. Волкодав, В.М. Масалов, Э.Н. Самаров, А.В. Баженов, С.И. Божко, И.А. Карпов, Е.Е. Якимов. *ФТП*, **38**, 884 (2004).
- [11] Y. Xia, V. Gates, S. Park. *J. Lightwave Technol.*, **17**, 1956 (1999).
- [12] А.Н. Грузинцев, Г.А. Емельченко, В.М. Масалов, М. Романелли, К. Барту, П. Беналлул, А. Мэтр. *Неорг. матер.*, **44**, 203 (2008).
- [13] M. Megens, J.E.G.J. Wijnhoven, A. Lagendijk, W.L. Vos. *Phys. Rev. A*, **59**, 4727 (1999).
- [14] S. Hong, T. Joo, W.L. Park, Y.H. Jun, G.C. Yi. *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 4157 (2003).

*Редактор Л.В. Шаронова*

## **Photoluminescence of the ZnO infiltrated in 3D photonic crystal**

*A.N. Gruzintsev, G.A. Emelchenko\*, V.M. Masalov\**

Institute of Microelectronics Technology Problems,  
Russian Academy of Sciences,  
142432 Chernogolovka, Russia

\* Institute of Solid State Physics,  
Russian Academy of Sciences,  
142432 Chernogolovka, Russia

**Abstract** The influence of the photonic band gap of the photonic crystal synthetic SiO<sub>2</sub> opal with the introduced zinc oxide — on the ultraviolet luminescence was investigated. It was shown, that the photonic band gap position in the luminescence and reflectance spectra of the infiltrated opal depends on the diameter of silica nanospheres, on the zinc oxide volume filling factor and on the signal registration angle. Decrease of the emission intensity and increase of the luminescence decay time of the ZnO—opal nanocomposites were detected in the space directions, for which the spectral positions of the photonic band gap and of the zinc oxide luminescence maximum were the same. The variation of the decay time can be explained by the modifications of the photonic local density of states due to the photonic band gap.